

文章编号 1004-924X(2001)02-0115-06

摄像稳定技术

沈宏海, 刘晶红, 贾平, 刘洵, 李兴华

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 随着光电监视、跟踪、侦察系统使用要求的不断提高, 对光学图像的稳定要求也日趋严格。图像不稳定的实质是摄像系统的光轴与目标之间有无效的相对运动, 包括平移和角运动, 其中相对角运动对图像的影响尤为严重, 论述了现在采用的两类稳像方法, 并对新一代的稳像技术——电子学稳像作了概要的介绍, 阐述了平台稳定方法和电子学稳像技术在应用中的技术难点。

关键词: 摄像, 图像稳定, 瞄准线

中图分类号: TN 942.2 **文献标识码:** A

1 引言

图像稳定技术包括摄像机、导引头、火控武器的瞄准线等的稳定。用于人眼观察的摄像系统, 图像的不稳定会使观察者产生疲劳感, 进而容易导致误判和漏判; 对于目标自动识别与跟踪系统会导致动态跟踪误差增大, 降低跟踪目标的能力。引起摄像系统光轴与目标之间的角运动有两种情况: 一种是目标的运动, 另一种是载体的运动。通常摄像时目标距离摄像机较远, 因目标运动而造成的相对运动较小; 然而载体姿态的变化会完全传递给摄像系统的瞄准线, 其造成的相对角速度很大。两者相比, 前一个因素可以忽略, 所以稳像系统一般都只考虑隔离载体运动。现在使用的方法主要有光学的方法、光学和电子学结合的稳定平台主动补偿方法以及电子学稳像的方法。

在相当程度上, 图像稳定技术就是要隔离外部对摄像机的扰动, 最直接的方法是将摄像系统架设在减振装置上, 但是其缺点是减振器只能隔离载体的高频低幅振动, 并且经过减振以后的窄带随机振动都在系统的固有频率附近, 若谐振频率在系统带宽之内将使图像始终都在不断地抖动, 所以必须提高系统的刚度, 保证系统谐振频率远大于系统的带宽, 低频振动极易使摄像系统丢

失目标, 解决的方法是采用光学系统的方法或图像处理的方法。

2 光学稳定方法及其存在的问题

光学稳像的方法主要可分为利用折射元件、利用反射元件、利用结构光学元件作为调整元件的系统。根据稳像元件的位置又分为^[1]像空间稳像和物空间稳像方法。在平行光路对视线的控制中, 常常可以使用以下的几种方法:

2.1 利用折射元件的方法

使用折射元件的典型方法是利用可变光楔来控制瞄准线的方向(图1), 它是由美国的Dyna-science公司的科技人员最初提出的, 根据出射角和入射角之间的关系:

$$\beta = n\alpha = \alpha + (n - 1)\alpha$$

通过移动或转动一个角度为 α 、折射率为 n 的光楔, 使出射光线按近似 $(n - 1)\alpha$ 的角度改变方向来进行像的随机扰动补偿。可变光楔有三种实现方式: 1) 使用液体光楔; 2) 利用两个互补的平凹和平凸的透镜, 当在平衡位置时等效于一个平行光板; 3) 包括两个绕额定光轴相反旋转的固定光楔, 两者的组合运动可达到在锥角内作任一个方向的偏转, 其极限由光楔的折射率与顶角来确定。

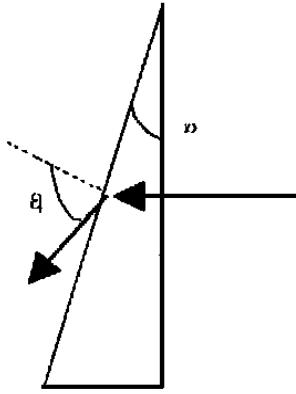


Fig. 1 Principle of wedge refraction compensation

这种稳像技术在日本佳能摄像机中得到了应用。采用可变光楔进行稳像的主要缺点可以归纳为以下几点^[1-2]:

(1) 楔形镜补偿只能保证对图像中一个场点的图像运动速度进行补偿;

(2) 除零位以外的所有位置由于二级光谱的存在, 必须对楔形镜消色差和消复色差, 因此使补偿器的结构及制造工艺大为复杂;

(3) 只有在平行光束中才存在令人满意地工作的可能性, 结果大大增加了仪器的体积。

这些缺点限制了楔形镜补偿器在高分辨率的光学仪器中, 特别是在侦察设备中的使用, 但是在振动较小的环境条件下的电视系统中还是得到了应用。

2.2 利用反射光学元件的方法

反射光学元件包括单反射镜、角反射镜。反射镜稳定方法是通过适当的转动一块、两块或多块透镜以补偿由于稳定误差的影响而出现的像移, 其中惯性稳定的方法得到了相当广泛的应用, 该方法通过陀螺作为敏感元件使其保持空间的稳定, 也有采用音叉^[2-5]的方法起传感器的作用。北京理工大学^[3]的谷素梅等研制的双目望远镜就是利用屋脊棱镜的横向偏移来稳像的。

反射镜稳定方式较适合小口径的光学传感器系统^[2-4]。要特别注意采用适当的结构设计和光路调整技术, 以消除或补偿反射镜和传感器之间的相对运动。在高精度的稳像系统中, 仅仅依靠棱镜、反射镜或光楔等被动补偿所达到的稳定精度是无法满足要求的, 反射镜单独使用的时候, 由于 2:1 的光机偏转比, 加上半角机构的误差, 精度难以做得很高, 这种稳定方法只能用于中低级精度的稳定系统中, 更高精度的稳定系统可以通过平台式稳定方法来完成。

3 陀螺稳定平台的现状及其控制技术的发展趋势

平台式稳定方式^[5]是通过惯性元件敏感载体的姿态角的变化, 其输出信号经过放大后驱动电机或压电陶瓷来保持摄像机或反射镜、棱镜以保证成像不变。根据消除稳定误差的方式又分为一级稳定和二级稳定两类。

3.1 一级稳定

一级稳定技术中的整体稳定得到了广泛的应用(图 2), 它是采用一个环架系统作为光电传感器的光学平台, 在平台上放置陀螺来测量平台的运动, 陀螺敏感姿态角的变化经过放大以后反馈给环架的力矩电机, 通过力矩电机驱动平台使光电传感器保持稳定。通常整体稳定^[5-6]的方法可分为双轴陀螺稳定平台、三轴陀螺稳定平台和四轴陀螺稳定平台。其中双轴陀螺稳定平台又分为两轴二环和两轴四环两类; 由于两轴稳定平台固有的原理误差, 它不可能完全隔离载体的扰动力矩, 导致瞄准线围绕光轴旋转, 当旋转速度较大时会对像质造成严重影响。要完全隔离须采用三轴的陀螺稳定平台, 还有一种方法是采用两轴四环^[7]的稳定平台, 这两种方法在原理上可以完全隔离载体的扰动。两轴、三轴稳定技术在各国的机载侦察设备中得到了广泛的运用, 在空地导弹中, 三轴陀螺稳定平台得到了广泛的应用, 如美国的“幼畜”AGM-65A 导弹。

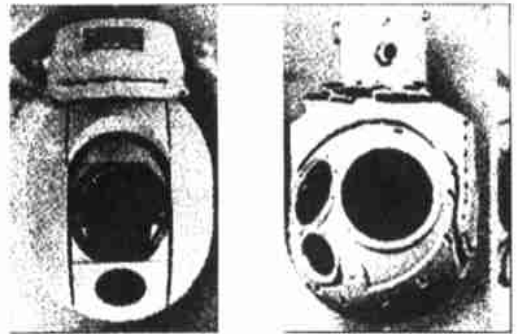


Fig. 2 Gyro-stabilization platform

在整体稳定系统中的主要误差来源有以下几个方面:

力矩误差: 包括摩擦力矩和不平衡力矩、风阻力矩, 比较特殊的是摩擦力矩^[6], 它对系统的低速平稳性有很大的影响, 将摩擦力矩看做常值处理是不够的, 高精度的系统中采用引入状态观测器或模型辨识技术实现摩擦力矩的动态补偿。

传感器误差包括陀螺仪的漂移、信噪比、CCD 的视轴安装误差、A/D 和运放等电子系统的偏差和噪声、信号处理电路的延迟等, 其中, 位于最前端的陀螺的漂移噪声对稳定精度的影响较大, 改进的方法可以考虑采用微弱信号检测技术提取信号, 用建立漂移模型^[11-13]的办法补偿漂移。

整体稳定一般适合较小的光电传感器负载, 对于较大的负载则效果不佳, 它受到摩擦力矩和静不平衡力矩的影响, 随着负载的增加, 力矩电机的齿槽效应及热噪声、各传感器的导线扭矩等都有增加, 其精度在 0.1m rad 左右。

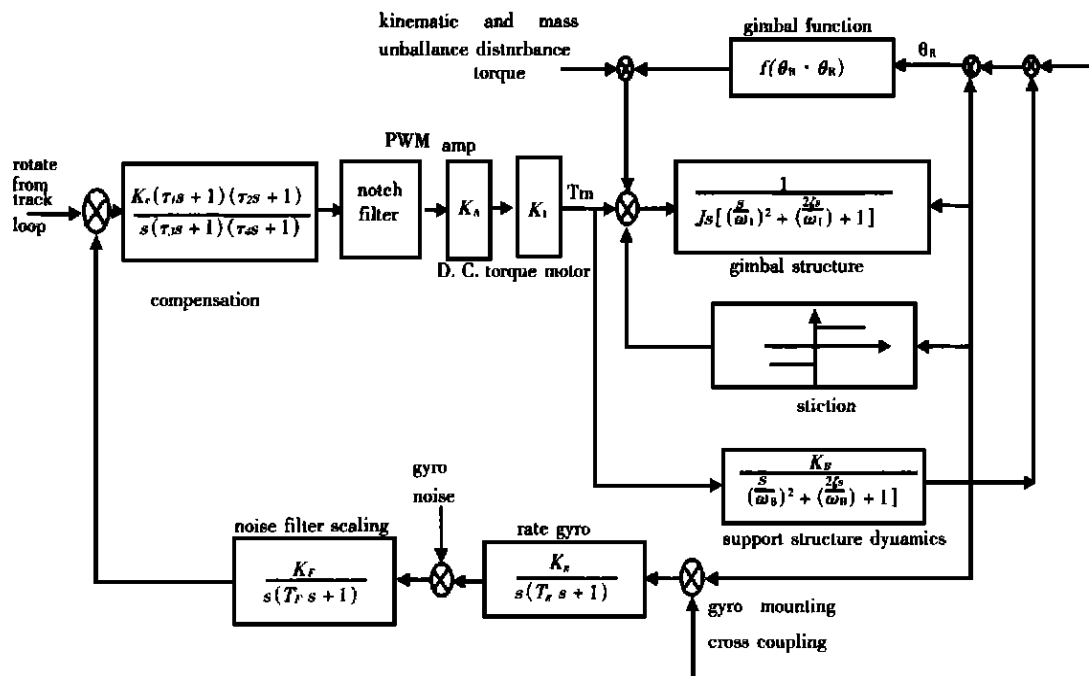


Fig 3 Noise of the gyro-stabilization platform

3.2 二级稳定方法

由于一级稳定完全依靠稳定平台来稳定瞄准线, 受到的各种干扰较多, 限制了稳定精度的提高, 进一步考虑, 可以利用稳定平台实现粗调, 用反射镜实现精调, 它是反射镜和稳定平台的组合使用, 可以达到微弧度级的稳定精度。这种稳定反射镜的技术^[1-2]在国外的高精度侦察系统和激光通信系统中得到了广泛的应用, 以色列已经可以做到 $15\mu\text{rad}$ 的稳定精度。

在陀螺稳定平台中摩擦力矩的抖动是影响陀螺稳定平台精度的重要因素, 这集中体现在低速平稳性的问题上, 陀螺稳定平台中通常采用超前滞后补偿的方法, 为了提高带宽再引入前馈, 然而在宽频带、高精度的跟瞄系统中, 采用这样的方法达到设计指标比较困难, 必须考虑引入现代控制方法, 现代控制技术^[14-16]对参数扰动的鲁棒性使得它比较适合于陀螺稳定平台的伺服设计, 其典型代表有滑模变结构控制技术(VSC)、模糊控制技术、线性二次型最优控制技术(LQG), 其中滑模变结构控制, 根据对开关线的不断切换可以有效地克服系统的各种扰动, 它对参数摄动和外部扰动不敏感的优点使得它近年来在交直流伺服系

统中得到了广泛的应用。较普遍采用的方法是现代控制技术与PD控制技术的结合, 这种技术已经在雷达天线的稳定技术中得到应用^[15], 这为陀螺稳定平台整体性能的提高提供了一种新的途径。

4 电子学稳像的现状及其发展趋势

采用光学、光电的方法稳像带来的一个问题就是增加了系统的功耗和重量, 而对弹载、轻型飞机、星载或外星球探测中的跟瞄、成像设备来说, 质量和功耗的问题是非常重要的两个参数。采用电子学方法的稳像技术具有功耗低、质量轻、硬件处理速度快的优点, 所以美国、日本、加拿大、土耳其和意大利等国^[17-21]对此展开了深入的研究, 其中日本松下公司在其摄像仪方面开展了广泛的研究, 美国和加拿大在预警系统和侦察飞机的电子稳像方面取得了成功的应用。由美国国防部高科技研究局(DARPA)和马里兰大学(Maryland Univ.)研制的无人驾驶车辆监视、搜索、侦察系统中已经采取了软件稳像的技术, 其稳定精度优于一个像元。加拿大的Defense Research Establish-

ment V ilcartier (DREV) 也已经成功地将这项技术应用到他们的侦察车上, 将摄像机架设在距控制车 200m 外的三脚架上或架在 10m 高的桅杆上实现 30 帧/s 的实时监控, 可以达到一个像元的稳像精度; 由该国 Lyre Technologies 公司和 DREV 研究的机载侦察摄像系统中也已经有了类似的实验装置。

图像稳定的目的是要找到每一帧图像相对于参考图像的全局运动矢量, 然后用解算出的运动

参数去控制 CCD 输出像元各行列的起始读取位置, 从而达到图像补偿稳定的目的。电子学稳像系统一般包括三个主要的功能模块, 即运动矢量的检测模块, 补偿量输出模块和图像补偿模块, 其系统框图^[21]如图 4 所示:

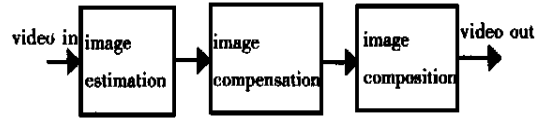


Fig 4 Modules of a general EIS system

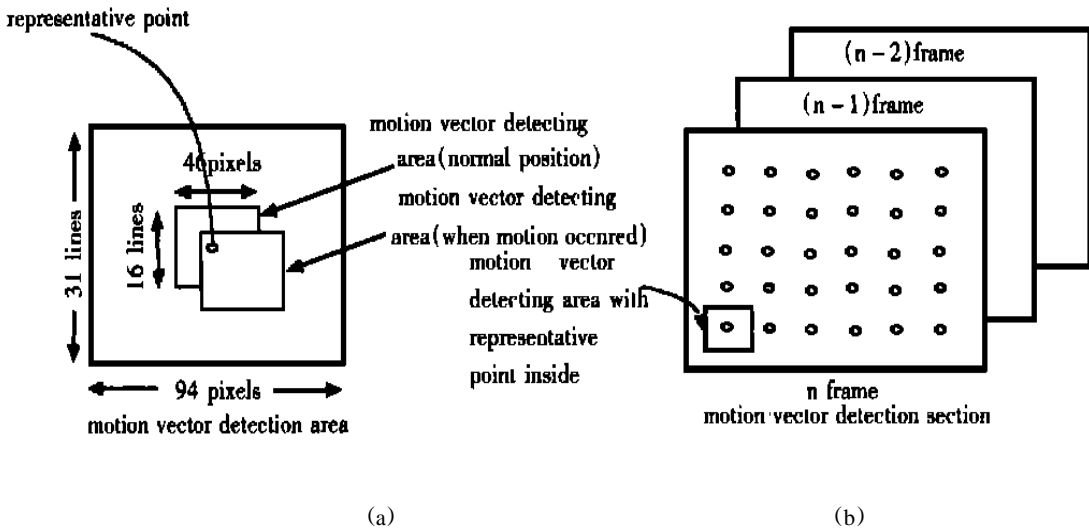


Fig 5 Motion vector detector area

由于在检测摄像机的运动矢量的时候, 会因为背景噪声, 如小动物的移动或运动, 树枝、叶的摇动, 以及目标本身的运动、异物进入视场等都会对摄像机运动矢量的提取产生影响。又例如当摄像机做全景扫描时, 若被稳像系统误以为是振动而稳定了, 就达不到全景扫描的目的了。这些都是电子学稳像技术所需要考虑解决的。

检测图像运动矢量的方法大致可以分成两类: 利用传感器敏感运动矢量的方法和利用特征量匹配的方法, 现在主要采用特征量匹配的算法稳定图像^[17-19]。

日本的 Ego sa 等人采用的方法是将图像分为四个区域(图 5b), 每个区域中有 30 个代表点, 每个代表点有 16×46 个像素的比较面积。首先计算前一场代表点像素数据与当前场相对应的比较面积中所有像素之间绝对差值, 从而建立起两场图像代表点之间的关系式, 最后, 以所有代表点为参考点组成相对坐标系, 相对于每个坐标作一个相同位移值 (i, j) , 相应有一个绝对差值, 对所有代表点坐标的绝对差值求和为 $P(i, j)$, 获得一

个相关函数, 具有最高相关性的位移值就是检测出的运动矢量。由于量化的原因, 图像的运动矢量是一个离散值。运动矢量不连续导致观察时图像缺乏平滑的感觉, 为此需要对运动矢量做内插值处理, 经过插值处理后的运动矢量的检测精度明显优于未经插值处理的方法。在判断运动矢量的时候为了减小误判的几率而引入了模糊控制的技术, 对不同的运动矢量分配相应的隶属度, 引入该方法有效地提高了稳定的效果。

图像的位移包括整数部分和小数部分, 整数部分可以采用相位相关的方法检测到, 小数部分的位移常常导致图像的跳动, 尤其是在背景静止时。要做到亚像元级的稳定精度, 就必须检测出位移的小数部分, 所用的方法有基于图像灰度匹配的方法、基于时空微分 (spatio temporal differentiation) 的方法及参数平面与相位互相关拟合 (phase and cross correlation surface) 的方法。

5 对图像稳定的评价

图像在达到什么样的稳定程度以后算是稳定的, 目前还没有统一的评价方法, 普遍认为光学传递函数 $MTF^{[18-19]}$ 可以提供一个客观的评价标准, 对于动基座的摄像系统来说, 首先要考虑稳定系统对载体振动的隔离度, 进而对各种扰动的物理模型进行精确建模, 图像的稳定很大程度上取决于模型的精确程度, 但是使用过于复杂的模型去拟合数据, 并不一定会取得更好的结果^[19]。实际情况是模型越复杂, 对跟踪误差越敏感, 实际效果并不比简单模型好。

一般认为对于用于人眼观察的摄像系统, 振动造成的影响小于 0.5 个像元时就可以认为图像是稳定的, 而对于用于计算机目标跟踪的摄像系统则 0.5 像元的稳定精度仍是不够的, 美国 DARPA 的实验也表明了这一点。

6 结 束 语

现代图像稳定系统中广泛采用陀螺稳定平台实现稳像、稳瞄, 随着稳定精度要求的不断提高,

用经典的伺服方法达到技术指标已经越来越困难, 现代控制理论在稳像、稳瞄系统中的应用已经越来越多, 鲁棒控制技术在宽频带、高精度的跟瞄稳像系统中有较大的应用前景。电子稳像技术就目前所能够得到的公开文献来看, 已经能够做到实时处理, 但是在要求同时考虑平移、旋转和多目标观察有一定的困难, 其固有的特性也决定了它难以适应大幅度振动的情况, 但是若只用电子稳像处理平移运动, 则可以将它作为陀螺稳像的后续装置来进一步提高稳像精度。现代光电侦察系统向着多波段、小型化的方向发展, 在多波段的侦察系统中, 对每个传感器分别采取伺服稳定的方法是不可取的, 其结果将是研制周期长, 系统庞大而复杂, 与平台稳定的方法相比, 电子学稳像具有很强的模块性, 可以即插即用, 由于其稳定精度很大程度上依赖于运动模型的精确程度, 所以需要进一步研究的方向应该是考虑如何准确建立图像运动的模型, 实现在多目标、复杂运动的情况下实现图像的稳定输出, 以及如何提高稳像的适用范围; 至于实时性主要受到当前电子器件的运算速度的限制, 随着今后技术的进步, 这应该不是主要问题。

参考文献:

- [1] Netser Y. Image stabilization[J]. Opt Eng, 1982, 11(9): 1191- 20
- [2] . . 光学图像的稳定方法及装置[J] . . . , 1982, (1): 46- 55
- [3] 谷素梅 小型光学惯性稳像跟踪系统的研究[J]. 北京理工大学学报, 1991, 11(4): 32- 36
- [4] 王志坚 激光扩束制导稳定方法的研究[D]. 长春: 长春光学精密机械学院, 1994
- [5] 郭富强, 于波, 汪叔华 陀螺稳定装置及其应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995
- [6] 马佳光 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. 光学工程, 1989, (3): 1- 41
- [7] 纪明 多环架光电稳定系统及分析[J]. 应用光学, 1994, 15(3): 60- 64
- [8] 贾平, 等 轻型光电稳定平台设计报告[R]. 长春: 中科院长春光学精密机械研究所, 1999
- [9] 王淑青, 傅承毓 神经网络在快速反射镜控制系统中的应用仿真[J]. 光电工程, 1996, 23(4): 1- 9
- [10] 赵长德, 张煜, 陈科 具有 C196 微控制器的瞄准线与自动跟踪系统[J]. 清华大学学报, 1998, 38(11): 23- 27
- [11] 高钟毓, 王永梁 近似非线性滤波在陀螺漂移误差模型辨识中的应用[J]. 清华大学学报, 1992, 32(4): 35- 41
- [12] 杨友堂, 姜宏, 杨位钦 陀螺漂移的状态空间建模方法[J]. 清华大学学报, 1997, 37(8): 15- 18
- [13] 陈熙源, 万德钧, 程启明, 等 陀螺随机漂移的神经网络预报方法研究[J]. 东南大学学报, 1998, 28(5): 79- 83
- [14] Bigley W J. Optimal motion stabilization control of an electro-optical sight system [C]. Proc SPIE, 1989, 1111: 116- 120
- [15] 阎洁, 唐建中, 史维祥, 等 FUZZY 控制在舰载雷达稳定平台伺服系统中的应用[J]. 兵工学报, 1999, 20(2): 182- 185
- [16] 熊永明, 滕云鹤, 章燕申 惯性稳定平台变结构稳定回路的研究[A]. 智能控制与自动化——第一届全球华人智能控制与自动化研究大会论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1993
- [17] 陈晓钟, 孙华燕 一种自然纹理背景下的图像目标检测方法[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(5): 421- 424
- [18] 李兴华, 翟林培 神经网络用于凸轮机构稳速控制[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(2): 165- 168
- [19] Belanger L N, Gagnon R, Lessard P, Macheux J, Blanchard A. Pixel and subpixel image stabilization at video rate

for airborne imaging sensors[C]. Proc SPIE, 1994, 2269: 152- 159

[20] Morimoto C, Chellappa R. Evaluation of image stabilization algorithms[J]. IEEE, 1998, (5): 2789- 2792

[21] Hadar O, Kopeika N S, Rotman S R. Quantitative evaluation of target acquisition when restoring image blurred by sensor motion[C]. Proc SPIE, 1995, 2426: 115- 127.

Overview of imaging stabilization

SHEN Hong-hai, LU Jing-hong, JIA Ping, LU Xun, LI Xing-hua

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: In pace with the development of optoelectronic surveillance, tracking and reconnaissance systems, the requirement for image stabilization becomes more and more important. In fact, the image unstabilization is caused by displacement between the LOS of camera and the objects, including translation and angle rotation, in which, the rotation has special influence on images. The paper discusses two kinds of available image stabilization methods and the modern way for electronic-stabilization, and also gives analysis on the platform stabilization method and key technical problems in the applications of the electronic stabilization methods.

Key words: imaging; image stabilization; line-of-sight

作者简介: 沈宏海(1976-),男,江苏东台人,1998年入中科院长春光机所攻读机械电子工程硕士学位,目前主要从事光电控制的工作,亦关注于视频信号处理和光学信息处理。

欢迎您订阅《光机电信息》

《光机电信息》是由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办的科技类信息刊物。主要报道国内外光机电领域的前沿与发展动态,内容包括光学、光电子学、激光、光通信、发光学、精密机械、医用光学、军用光学、航空航天技术、微机械、计算机与测量技术等高新技术的各个领域,涉及科技热点评述、趋势与动向、科学专题、研究综述、科学探索、市场动态、新产品开发和高新技术产业化等多方面内容。

为满足不同读者的不同需求,在传播和报道国内外最新信息的同时,我们努力将办刊和为科研生产服务有机地结合在一起,对《光机电信息》所报道的每一专题,乃至每一条信息,我们都可以利用长春光机所的丰富馆藏优势和先进的计算机检索系统,为读者展开深层次的文献跟踪服务,这是我们在新世纪对广大读者的又一庄重承诺!

本刊为月刊,国内外公开发行,每期定价 5.00 元,全年 60.00 元(含邮费)。个人订阅,通过邮局汇款。单位订阅,请填写订购单位通信签、长春光机所财务科存根《记账凭证》,连同款项通过银行寄回。欢迎广大读者订阅并投稿。

地 址: 长春市 1024 信箱《光机电信息》编辑部

开户行: 中行吉林省分行营业部

账 户: 04 单位 438 部

账 号: 018211000889

国内邮发代号: 12- 171

《光机电信息》编辑部